

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Уривський Л.О., Мошинська А.В., Осипчук С.О.**

УДК 621.395.001

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**для виконання лабораторних робіт з дисципліни**

**«Імітаційне моделювання об'єктів в телекомунікаційних  
системах»**

для студентів денної форми навчання спеціальності  
172 – Телекомунікації та Радіотехніка

Київ 2021

Методичні рекомендації розглянуто на засіданні Вченої ради ІТС  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Протокол № 4 від «26» квітня 2021 року.

***Розробники:***

***д.т.н. доцент Мошинська А.В.***  
***д.т.н., професор Уривський Л.О.***  
***к.т.н. Осипчук С.О.***

## ЗМІСТ

1. Загальні відомості.....	4
2. Мета і завдання дисципліни.....	4
3. Лабораторна робота №1. Тестування генераторів випадкових чисел на ЕОМ.....	6
4. Лабораторна робота №2. Моделювання та верифікація законів розподілу випадкових величин.....	9
5. Лабораторна робота №3. Моделювання сигналів і завад у каналі зв'язку.....	12
6. Лабораторна робота №4. Побудова імітаційної моделі і дослідження OFDM сигналу.....	15
7. Лабораторна робота №5. Моделювання системи масового обслуговування виду М/М/1 без очікування.....	19
8. Лабораторна робота №6. Моделювання системи масового обслуговування виду М/М/1/1 та М/М/2.....	24
9. Лабораторна робота №7. Просторові моделі телекомунікаційних систем.....	29
10.Перелік рекомендованої літератури.....	34
ДОДАТОК А. Теоретичні дані для виконання лабораторних робіт.....	36

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в телекомунікаційних системах» належить до практичних дисциплін спеціальної підготовки студентів за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка спеціалізації «Телекомунікаційні системи та мережі».

Дисципліна спрямована оволодіння такими знаннями, як: операційні системи (ОС), створення імітаційної моделі мовами імітаційного моделювання, організація модельного експерименту з використанням сучасних інструментальних засобів для імітаційного моделювання на ЕОМ.

Вивчення дисципліни базується на знанні студентами матеріалів дисциплін:

вища математика, теорія ймовірності, теорія складних систем, теорія завадостійкості, основи теорії телекомунікацій, інформатика та обчислювальна техніка, основи наукових досліджень.

## 2. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ

**Метою** є формування у студентів наступних здатностей:

- створенню імітаційної моделі мовами імітаційного моделювання;
- організація модельного експерименту з використанням сучасних інструментальних засобів для імітаційного моделювання на ЕОМ

**Завдання вивчення дисципліни:**

- формування у студентів вміння побудови імітаційних моделей при аналізі сучасних телекомунікаційних мереж.

В результаті вивчення навчальної дисципліни студенти повинні

**ЗНАТИ:**

1. Принципи побудови моделей передачі інформації по каналах телекомунікаційних систем на фізичному, каналному та мережевому рівні.

2. Критерії та засоби оцінювання інформаційної ефективності телекомунікаційних систем на основі моделей фізичного та каналного рівнів.

3. Основні поняття, підходи та прийоми, що використовуються для імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж і систем.

УМІТИ:

1. Моделювати випадкові процеси в ТК системах.

2. Моделювати об'єкти фізичного рівня ТК систем.

3. Моделювати об'єкти каналного рівня ТК систем.

4. Моделювати об'єктів мережевого рівня ТК систем.

МАТИ УЯВУ:

Про принципи побудови та функціонування телекомунікаційних систем и мереж наступного покоління.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №1*

«Тестування генераторів випадкових чисел на ЕОМ»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(підпис викладача)

*Київ 2021*

### План роботи:

1. Отримання набору із 100 випадкових чисел в ПЗ Excel, MatLab в інтервалі [0,1].
2. Визначення значень показників випадковості отриманих послідовностей:
  - a. Математичне очікування;
  - b. Дисперсія;
  - c. Побудова гістограми для отриманих значень з десятима інтервалами на проміжку [0,1];
  - d. Коефіцієнт серій переходу чисел значення 0,5.

### Отримані результати:

Кожен пункт **плану роботи** передбачає **результат**, представлений у звіті в формі числових значень, використаних формул у відповідності із синтаксисом ПЗ Excel та Matlab, коду програми та необхідних графіків.

#### ***Використані формули в ПЗ Excel для виконання роботи:***

#### ***Лістинг програми в MatLab:***

Таблиця 1. Показники та отримані результати

	<i>Програмне середовище для ІМ</i>	
	<b>Excel</b>	<b>MatLab</b>
Кількість згенерованих випадкових чисел для дослідження		
Математичне		

очікування		
Дисперсія		
Коефіцієнт серій переходу чисел значення 0,5		

Гістограма для отриманих значень з десятима інтервалами на проміжку  $[0,1]$  в **Excel**:

Гістограма для отриманих значень з десятима інтервалами на проміжку  $[0,1]$  в **MatLab**:

За результатами виконання плану роботи зробити висновки.

Висновки:



НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №2*

«Моделювання та верифікація  
законів розподілу випадкових величин»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)  
захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

(підпис викладача)

*Київ 2021*

### План роботи:

1. У програмному середовищі Excel згенерувати 100 псевдовипадкових чисел.
2. Інтервал  $0 \dots 1$  розділити на 10 субінтервалів, визначити кількість потраплянь згенерованих значень у кожний інтервал.
3. Побудувати гістограму розподілу отриманих значень.
4. Висунути гіпотезу про закон розподілу псевдовипадкових чисел.
5. Визначити (задати) закон розподілу псевдовипадкових чисел згідно висунутої гіпотези.
6. Верифікувати за критерієм Хі-квадрат, чи відповідає висунута гіпотеза про закон розподілу отриманим псевдовипадковим значенням, та з якою точністю (додаток 1). Занести дані до таблиці 1.
7. Повторити кроки 1-6 для 500, 1000, 5000, 10000 значень.
8. Повторити кроки 1-7 в програмному середовищі MatLab.
9. Побудувати графічно залежності  $X^2 = f(n)$  для отриманих значень в Excel і MatLab згідно таблиці 1.
10. Зробити висновок про те, який із досліджених псевдовипадкових генераторів краще відповідає висунутій гіпотезі про закон розподілу псевдовипадкових чисел (має швидшу збіжність із законом).

Таблиця 1

Число експериментів, $n$	Excel		MatLab	
	Значення Хі-квадрат, $X^2$	Точність, $p$	Значення Хі-квадрат $X^2$	Точність, $P$
100				
500				
1000				
5000				
10000				

Отримані результати:

Кожен пункт **плану роботи** передбачає **результат**, представлений у звіті в формі *числових значень, використаних теоретичних формул, формул у відповідності із синтаксисом ПЗ Excel та Matlab, коду програми та графіків.*

*< Результати виконання роботи >*

За результатами виконання роботи зробити висновки.

Висновки:

**Додаток 1.** Значення Хі-квадрат та відповідні рівні значущості (точності)

Число степеней свободы $\nu$	Уровень значимости $\alpha$					
	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,99
1	6,6	5,0	3,8	0,0039	0,00098	0,00016
2	9,2	7,4	6,0	0,103	0,051	0,020
3	11,3	9,4	7,8	0,352	0,216	0,115
4	13,3	11,1	9,3	0,711	0,484	0,297
5	15,1	12,8	11,1	1,15	0,831	0,554
6	16,8	14,4	12,6	1,64	1,24	0,872
7	18,5	16,0	14,1	2,17	1,69	1,24
8	20,1	17,5	15,5	2,73	2,18	1,65
9	21,7	19,0	16,9	3,33	2,70	2,09
10	23,2	20,5	18,3	3,94	3,25	2,56
11	24,7	21,9	19,7	4,57	3,82	3,05
12	26,2	23,3	21,0	5,23	4,40	3,57
13	27,7	24,7	22,4	5,89	5,01	4,11
14	29,1	26,1	23,7	6,37	5,63	4,66
15	30,6	27,5	25,0	7,20	6,26	5,23

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №3*

«Моделювання сигналів і завад у каналі зв'язку»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис викладача)

*Київ 2021*

### План роботи:

1. Інструменти для виконання роботи: MS Excel, MatLab. У звіті лабораторної роботи представити формули MS Excel та лістинг програми в MatLab.
2. Згенерувати вектор завади з нормально розподіленими значеннями амплітуди згідно заданого параметру  $h^2$  (варіанти див. в табл. 1) і рівномірно розподіленими значеннями фази,  $\varphi \in (0; 2\pi]$ .
3. Сформувати результуючий вектор взаємодії вектору завади з одиничним непорушним вектором ( $\varphi = 0$ ), що представляє значення «1» сигналу ФМ-2.
4. Перевірити умову потрапляння кута повороту результуючого вектору в діапазон  $+\pi/2$  та  $-\pi/2$  для сигналу ФМ-2.
5. Пункти 2-4 виконати не менше  $n=10^5$  разів. Підрахувати загальну кількість експериментів  $n$ .
6. Підрахувати кількість експериментів  $m$ , для яких кут повороту результуючого вектору не потрапив у діапазон  $+\pi/2$  та  $-\pi/2$  для сигналу ФМ-2.
7. Оцінити достовірність помилки  $p_{\text{пом.}} = m/n$  на основі отриманих значень імітаційного моделювання.
8. Розрахувати аналітично достовірність помилки  $p_{\text{пом.аналіт.}}$  для заданого значення  $h^2$  для ФМ-2.
9. Порівняти розраховане значення ймовірності помилки  $p_{\text{пом.аналіт.}}$  при ФМ-2 із значенням помилки  $p_{\text{пом.}}$ , отриманим на основі імітаційної моделі для векторно-фазового методу для оцінки впливу завади на сигнал ФМ-2,
- 10.Зробити висновок.

**Таблиця 1. Варіанти**

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$h^2$ , разів	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
$\Sigma$	0.33 3	0.28 6	0.25 0	0.22 2	0.20 0	0.18 2	0.16 7	0.15 4	0.14 3	0.13 3	0.12 5
$\sigma^2$	0.11 1	0.08 2	0.06 3	0.04 9	0.04 0	0.03 3	0.02 8	0.02 4	0.02 0	0.01 8	0.01 6

Отримані результати:

Кожен пункт **плану роботи** передбачає **результат**, представлений у звіті в формі *числових значень*, *використаних теоретичних формул*, формул у відповідності із синтаксисом ПЗ Excel та Matlab, коду програми та графіків.

Формули, використані в Excel для виконання роботи, з поясненнями:

Представити наступні графічні залежності:

1. Рис. 1. Сигнал ФМ-2: векторне представлення символів «1» і «0» (а), та їх часове представлення  $S(t)$  (б)
2. Рис. 2. Векторно-фазове представлення сигналу і завади

Лістинг програми в MatLab для виконання роботи, з поясненнями:

За результатами виконання роботи зробити висновки.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №4*

«Побудова імітаційної моделі OFDM сигналу»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис викладача)

*Київ 2021*

### План роботи:

1. Інструменти для виконання роботи: ПЗ MatLab.
2. У звіті лабораторної роботи представити:
  - a. Теоретичні дані для виконання роботи:
    - i. Математичний опис OFDM сигналу та його параметри;
    - ii. Векторно-фазове та часове представлення (графічно) OFDM сигналу;
    - iii. Сигнальне сузір'я точок модуляції QAM-4, векторно-фазове та часове представлення трьох довільних сигнальних точок модуляції QAM-4 в момент часу  $t = 0$ ;
    - iv. Етапи дослідження функції розподілу амплітуд OFDM сигналу;
    - v. Спосіб знаходження аналітичної функції розподілу OFDM сигналу, що відповідає розподілу отриманих значень OFDM сигналу експериментально;
    - vi. Перевірка гіпотези за критерієм  $\chi^2$ -квадрат.
  - b. Алгоритм побудови імітаційної моделі OFDM сигналу з модуляцією піднесучих сигнальною конструкцією QPSK, та отримання розподілу значень сумарного OFDM сигналу;
  - c. Лістинг коду програми імітаційної моделі сигналу OFDM з модуляцією піднесучих сигнальною конструкцією QPSK в ПЗ MatLab (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка);
  - d. Отримані результати роботи моделі:
    - i. графік розподілу значень амплітуди OFDM сигналу,
    - ii. гіпотеза про розподіл значень OFDM сигналу,
    - iii. відповідний теоретичний розподіл значень OFDM сигналу,
    - iv. перевірка гіпотези за критерієм  $\chi^2$ -квадрат згідно варіанту з табл. 1, де номер варіанту – порядковий номер студента в списку групи.



Таблиця 1. Варіанти завдання

Вар.	Число піднесучих $N_{\text{OFDM}}$	Число OFDM символів	Амплітуда підсилювача сигналу
1	32	100	5
2	64	50	6
3	128	25	7
4	32	120	8
5	64	70	9
6	128	30	10
7	32	110	11
8	64	60	12
9	128	35	13
10	32	90	14
11	64	45	15
12	128	40	16

**Теоретичні дані для виконання роботи:**

1. Математичний опис OFDM сигналу та його параметри:
2. Векторно-фазове та часове представлення (графічно) OFDM сигналу:
3. Сигнальне сузір'я точок модуляції QAM-4, векторно-фазове та часове представлення трьох довільних сигнальних точок модуляції QAM-4 в момент часу  $t = 0$ :
4. Етапи дослідження функції розподілу амплітуд OFDM сигналу:
5. Спосіб знаходження аналітичної функції розподілу OFDM сигналу, що відповідає розподілу отриманих значень OFDM сигналу експериментально:
6. Перевірка гіпотези про розподіл за критерієм  $\chi^2$ -квадрат:
7. Алгоритм побудови імітаційної моделі OFDM сигналу з модуляцією піднесучих сигнальною конструкцією QPSK, та отримання розподілу значень сумарного OFDM сигналу:

8. Лістинг коду програми (з коментарями) імітаційної моделі сигналу OFDM з модуляцією піднесучих сигнальною конструкцією QPSK в ПЗ MatLab (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка):

```
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка...
```

9. Отримані результати роботи імітаційної моделі OFDM сигналу з модуляцією піднесучих сигнальною конструкцією QPSK:
- a. Графік розподілу значень амплітуди OFDM сигналу:
  - b. Гіпотеза про розподіл значень OFDM сигналу:
  - c. Відповідний теоретичний розподіл значень OFDM сигналу:
  - d. Перевірка гіпотези за критерієм  $\chi^2$ -квадрат:

Висновки:

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №5*

«Моделювання системи масового обслуговування  
виду М/М/1 без очікування»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

захистив роботу «\_\_»\_\_\_\_\_202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис викладача)

*Київ 2021*

### План роботи:

1. Інструменти для виконання роботи: ПЗ MatLab.
2. У звіті лабораторної роботи представити:
  - a. Теоретичні дані для виконання роботи:
    - i. Генерування випадкових чисел, що відповідають експоненційному розподілу;
    - ii. Експоненційний закон розподілу випадкових величин, його характеристики та графічне представлення;
    - iii. Розподіл Пуассона, його характеристики та графічне представлення;
    - iv. Граф станів, вхідні та вихідні характеристики СМО М/М/1 без очікування;
  - b. Алгоритм побудови імітаційної моделі М/М/1 без очікування;
  - c. Лістинг коду програми імітаційної моделі в ПЗ MatLab (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка);
  - d. Отримані результати роботи моделі за різних значень інтенсивності потоку вхідних заявок, інтенсивності обслуговування та кількості модельованих заявок згідно варіанту з табл. 1, де номер варіанту – порядковий номер студента в списку групи.

Таблиця 1. Варіанти завдання

Варіант	Експеримент	$\Lambda$	$\mu$	Число модельованих заявок, n
1	1	1.0	2.0	5
	2	1.0	6.0	5
	3	5.0	1.0	5
	4	1.0	2.0	5000
	5	1.0	6.0	5000
	6	5.0	1.0	5000
2	1	1.3	2.3	7
	2	1.3	7.8	7
	3	6.5	1.3	7
	4	1.3	2.3	6000
	5	1.3	7.8	6000
	6	6.5	1.3	6000

Продовження таблиці 1. Варіанти завдання

<b>3</b>	1	1.6	2.9	10
	2	1.6	9.6	10
	3	8.0	1.6	10
	4	1.6	2.9	6750
	5	1.6	9.6	6750
	6	8.0	1.6	6750
<b>4</b>	1	1.9	2.5	14
	2	1.9	9.5	14
	3	9.5	1.9	14
	4	1.9	2.5	7750
	5	1.9	9.5	7750
	6	9.5	1.9	7750
<b>5</b>	1	2.2	2.9	19
	2	2.2	11.0	19
	3	11.0	2.2	19
	4	2.2	2.9	9000
	5	2.2	11.0	9000
	6	11.0	2.2	9000
<b>6</b>	1	2.5	3.3	25
	2	2.5	12.5	25
	3	12.5	2.5	25
	4	2.5	3.3	10500
	5	2.5	12.5	10500
	6	12.5	2.5	10500
<b>7</b>	1	2.8	3.6	32
	2	2.8	11.2	32
	3	14.0	2.8	32
	4	2.8	3.6	12250
	5	2.8	11.2	12250
	6	14.0	2.8	12250
<b>8</b>	1	3.1	4.0	40
	2	3.1	12.4	40
	3	14.0	3.1	40
	4	3.1	4.0	14250
	5	3.1	12.4	14250
	6	14.0	3.1	14250
<b>9</b>	1	3.4	4.4	49
	2	3.4	13.6	49
	3	15.3	3.4	49
	4	3.4	4.4	16500
	5	3.4	13.6	16500
	6	15.3	3.4	16500
<b>10</b>	1	3.7	4.8	59
	2	3.7	14.8	59
	3	16.7	3.7	59
	4	3.7	4.8	18000
	5	3.7	14.8	18000
	6	16.7	3.7	18000
<b>11</b>	1	2.5	3	8

	2	2.5	10	8
	3	10	2.5	8
	4	2.5	3	8000
	5	2.5	10	8000
	6	10	2.5	8000

### Теоретичні дані для виконання роботи:

1. Генерування випадкових чисел, що відповідають експоненційному розподілу:
2. Експоненційний закон розподілу випадкових величин, його характеристики та графічне представлення:
3. Розподіл Пуассона, його характеристики та графічне представлення:
4. Граф станів, вхідні, вихідні характеристики СМО М/М/1 без очікування:
5. Алгоритм побудови імітаційної моделі М/М/1 без очікування:
6. Лістинг коду програми імітаційної моделі в ПЗ MatLab, з коментуванням (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка):

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
 Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
 Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
 Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
 Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка...

7. Отримані результати роботи моделі за різних значень інтенсивності потоку вхідних заявок, інтенсивності обслуговування та кількості модельованих заявок згідно варіанту з табл. 1, де номер варіанту – порядковий номер студента в списку групи:

Варіант	Експеримент	$\lambda$	$\mu$	Число модельованих заявок, n
—	1			
	2			

Варіант	Експеримент	$\lambda$	$\mu$	Число модельованих заявок, n
	3			
	4			
	5			
	6			

1:

*Текст, графіки*

2:

*Текст, графіки*

3:

*Текст, графіки*

4:

*Текст, графіки*

5:

*Текст, графіки*

6:

*Текст, графіки*

Висновки:

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №6*

«Моделювання систем масового обслуговування  
виду М/М/1/1 та М/М/2»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис викладача)

*Київ 2021*



### План роботи:

11. Інструменти для виконання роботи: ПЗ MatLab.
12. У звіті лабораторної роботи представити:
  - a. Граф станів, вхідні та вихідні характеристики для СМО:
    - i. M/M/1/1;
    - ii. M/M/2;
  - b. На основі модифікації імітаційної моделі СМО M/M/1 без очікування, створеної в лабораторній роботі №5, алгоритм роботи імітаційної моделі для СМО:
    - i. M/M/1/1;
    - ii. M/M/2;
  - c. Лістинг коду програми в ПЗ MatLab (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка) імітаційних моделей для СМО:
    - i. M/M/1/1;
    - ii. M/M/2;
  - d. Отримані результати роботи моделей M/M/1/1 та M/M/2 за різних значень інтенсивності потоку вхідних заявок  $\lambda$ , інтенсивності обслуговування  $\mu$  та кількості модельованих заявок  $n$  згідно варіанту з табл. 1, де номер варіанту – порядковий номер студента в списку групи. Зробити висновки за результатами роботи моделей.

**Таблиця 1.** Варіанти завдання

Варіант	Експеримент	$\lambda$	$\mu$	Число модельованих заявок, $n$
<b>1</b>	1	1.0	2.0	5
	2	1.0	6.0	5
	3	5.0	1.0	5
	4	1.0	2.0	5000
	5	1.0	6.0	5000
	6	5.0	1.0	5000
<b>2</b>	1	1.3	2.3	7

Варіант	Експеримент	$\lambda$	$\mu$	Число модельованих заявок, n
	2	1.3	7.8	7
	3	6.5	1.3	7
	4	1.3	2.3	6000
	5	1.3	7.8	6000
	6	6.5	1.3	6000

<b>3</b>	1	1.6	2.9	10
	2	1.6	9.6	10
	3	8.0	1.6	10
	4	1.6	2.9	6750
	5	1.6	9.6	6750
	6	8.0	1.6	6750
<b>4</b>	1	1.9	2.5	14
	2	1.9	9.5	14
	3	9.5	1.9	14
	4	1.9	2.5	7750
	5	1.9	9.5	7750
	6	9.5	1.9	7750
<b>5</b>	1	2.2	2.9	19
	2	2.2	11.0	19
	3	11.0	2.2	19
	4	2.2	2.9	9000
	5	2.2	11.0	9000
	6	11.0	2.2	9000
<b>6</b>	1	2.5	3.3	25
	2	2.5	12.5	25
	3	12.5	2.5	25
	4	2.5	3.3	10500
	5	2.5	12.5	10500
	6	12.5	2.5	10500
<b>7</b>	1	2.8	3.6	32
	2	2.8	11.2	32
	3	14.0	2.8	32
	4	2.8	3.6	12250
	5	2.8	11.2	12250
	6	14.0	2.8	12250
<b>8</b>	1	3.1	4.0	40
	2	3.1	12.4	40
	3	14.0	3.1	40
	4	3.1	4.0	14250
	5	3.1	12.4	14250
	6	14.0	3.1	14250
<b>9</b>	1	3.4	4.4	49
	2	3.4	13.6	49
	3	15.3	3.4	49
	4	3.4	4.4	16500
	5	3.4	13.6	16500

	6	15.3	3.4	16500
<b>10</b>	1	3.7	4.8	59
	2	3.7	14.8	59
	3	16.7	3.7	59
	4	3.7	4.8	18000
	5	3.7	14.8	18000
	6	16.7	3.7	18000
<b>11</b>	1	2.5	3	8
	2	2.5	10	8
	3	10	2.5	8
	4	2.5	3	8000
	5	2.5	10	8000
	6	10	2.5	8000

## 2. Виконання роботи

1. Граф станів, вхідні та вихідні характеристики для СМО М/М/1/1:

2. Граф станів, вхідні та вихідні характеристики для СМО М/М/2:

3. Алгоритм роботи імітаційної моделі для СМО М/М/1/1:

4. Алгоритм роботи імітаційної моделі для СМО М/М/2:

5. Лістинг коду програми імітаційної моделі для СМО М/М/1/1 в ПЗ MatLab, з коментуванням (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка):

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка...

6. Лістинг коду програми імітаційної моделі для СМО М/М/2 в ПЗ MatLab, з коментуванням (шрифт Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка):

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка...

7. Зафіксувати отримані результати роботи моделей **М/М/1/1** та **М/М/2** за різних значень інтенсивності потоку вхідних заявок  $\lambda$ , інтенсивності обслуговування  $\mu$  та кількості модельованих заявок  $n$  в табл. 2. згідно варіанту з табл. 1, де номер варіанту – порядковий номер студента в списку групи.

**Таблиця 2.** Результати роботи моделей М/М/1/1, М/М/2 та М/М/1 (з лаб. 5)

					А) М/М/1/1		Б) М/М/2		В) М/М/1 без очік. (лаб. 5)	
Вар.	Експ.	$\lambda$	$\mu$	Заявки, $n$	Втрач. заявок, $n_{\text{втр}}$	Ймов. обслуг. заявки, $(n - n_{\text{втр}})/n$	Втрач. заявок, $n_{\text{втр}}$	Ймов. обслуг. заявки, $(n - n_{\text{втр}})/n$	Втрач. заявок, $n_{\text{втр}}$	Ймов. обслуг. заявки, $(n - n_{\text{втр}})/n$
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

#### **А) М/М/1/1**

1: Текст, графіки

2: Текст, графіки

3: Текст, графіки

4: Текст, графіки

5: Текст, графіки

6: Текст, графіки

#### **Б) М/М/2**

1: Текст, графіки

2: Текст, графіки

3: Текст, графіки

4: Текст, графіки

5: Текст, графіки

6: Текст, графіки

**Висновки:**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальна дисципліна «Імітаційне моделювання об'єктів в  
телекомунікаційних системах»

*Звіт з лабораторної роботи №7*

«Просторові моделі телекомунікаційних систем»

Виконав: студ. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

захистив роботу «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р.  
з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підпис викладача)

*Київ 2021*

## План роботи:

1. Інструменти для виконання роботи:
  - е. ПЗ MatLab;
  - ф. Електронний ресурс для розрахунку траси розповсюдження сигналу з прив'язкою до місцевості (далі – середовище *rmonline*):  
<http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>
2. У звіті лабораторної роботи представити:
  - а. Аналітичні вирази для:
    - i. моделі поширення хвиль у вільному просторі для розрахунку рівня сигналу на вході приймача в умовах, коли передавальна і приймальна антени знаходяться на відкритій радіолінії без перешкод;
    - ii. розрахунку першої зони Френеля при розповсюдженні радіосигналу, та її суть;
    - iii. енергетичного показника  $h^2$  в точці прийому сигналу, та його зв'язок із відстанню між БС та приймачем;
    - iv. оцінки ймовірності помилки символу та біта для модуляцій QPSK, QAM-16, QAM-64;
    - v. розрахунку продуктивності системи передачі;
  - б. Результат оцінки продуктивності системи передачі на основі вихідних даних, представлених в табл. 1, та код програми в ПЗ MatLab для розрахунку продуктивності;
  - с. Результат оцінки траси розповсюдження сигналу для радіорелейного зв'язку з прив'язкою до місцевості в середовищі *rmonline* згідно вихідних даних, представлених в табл. 2;
  - д. Цифрову карту розрахованої траси;
  - е. Профіль розрахованої траси із зонами Френеля 1, 2, 3;
  - ф. Висновки за отриманими результатами.

**Таблиця 1.** Вихідні дані для розрахунку продуктивності системи передачі

Варіант → ↓ Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{пер}}, \text{дБм}$	33	36	30	39	42	33	36	30	33	39	30
$\Delta F, \text{МГц}$	5	10	20	5	10	20	15	10	5	22	10
$N_0, \text{дБм}$	- 105	- 110	- 107	- 104	-98  6	- 102	- 107	-99  6	- 103	- 102	- 106
Мод., QAM- X	4	16	64	4	16	64	4	16	64	4	16
$p_{\text{біт\_вим}}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
$a, \text{Ерл.}$	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,4	0,2	0,5	0,3	0,1	0,4
$q, \text{чол./км}^2$	20	40	30	50	40	60	30	20	20	40	50

**Таблиця 2.** Вихідні дані для оцінки траси розповсюдження сигналу для радіорелейного зв'язку з прив'язкою до місцевості

Варіант → ↓ Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{пер}}, \text{дБм}$	33	23	30	27	25	33	27	30	33	27	30
Чутливість приймача $S, \text{дБм}$	-95	-75	-90	-80	-85	-95	-75	-90	-80	-85	-70
$f_{\text{роб}}, \text{ГГц}$	5,7	5,9	5,7	5,9	5,7	5,9	5,7	5,9	5,7	5,9	5,7
$L, \text{км}$	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40	30
$G_1, \text{дБ}$	30	25	20	30	25	25	20	30	30	25	30
$G_2, \text{дБ}$	25	20	30	30	25	30	25	20	30	25	20
$h_1, \text{м}$	10	15	20	10	15	20	15	20	15	20	10
$h_2, \text{м}$	15	20	15	20	10	15	20	15	20	10	15

## Теоретичні дані для виконання роботи:

1. Аналітичні вирази 2.a.i-2.a.v згідно ходу роботи та їх складові:
2. Лістинг коду програми в ПЗ MatLab для розрахунку продуктивності

системи передачі, з коментуванням (шрифт Courier New, 11 pt,  
абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка):

Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка,  
Courier New, 11 pt, абзац одинарний, 0 pt до та 0 pt після рядка...

3. Результат оцінки продуктивності системи передачі на основі вихідних даних, представлених в табл. 1:
4. Результат оцінки траси розповсюдження сигналу для радіорелейного зв'язку з прив'язкою до місцевості в середовищі *rmonline* згідно вихідних даних, представлених в табл. 2:

А-Б					
<u>А</u> (1)			<u>(2) Б</u>		
Latitude	<input type="text"/>	°	Latitude	<input type="text"/>	°
Longitude	<input type="text"/>	°	Longitude	<input type="text"/>	°
Ground elevation	<input type="text"/>	M	Ground elevation	<input type="text"/>	m
Antenna height	<input type="text"/>	M	Antenna height	<input type="text"/>	m
Azimuth	<input type="text"/>	°	Azimuth	<input type="text"/>	°
Tilt	<input type="text"/>	°	Tilt	<input type="text"/>	°
<b>Radio system</b>			<b>Propagation</b>		
TX power	<input type="text"/>	dBm	Free space loss	<input type="text"/>	dB
TX line loss	<input type="text"/>	dB	Obstuction loss	<input type="text"/>	dB
TX antenna gain	<input type="text"/>	dBi	Forest loss	<input type="text"/>	dB
RX antenna gain	<input type="text"/>	dBi	Urban loss	<input type="text"/>	dB
RX line loss	<input type="text"/>	dB	Statistical loss	<input type="text"/>	dB
RX sensitivity	<input type="text"/>	dBm	Total path loss	<input type="text"/>	dB
<b>Performance</b>					
Distance		<input type="text"/>	Km		
Precision		<input type="text"/>	M		



Frequency		MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power		W
System gain		dB
Required reliability		%
Received Signal		dBm
Received Signal	_____	$\mu$ V
<b>Fade Margin</b>		<b>dB</b>

5. Цифрова карта розрахованої траси:

6. Профіль розрахованої траси із зонами Френеля 1, 2, 3:

Висновки:

## Перелік рекомендованої літератури

1. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Глав. ред. физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1968. - 356 с.
2. **Имитационное** моделирование производственных систем / Под. ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. – 416с.
3. **Кельтон В., Лоу А.** Имитационное моделирование. 3-е изд. — СПб.; Питер: Киев: Издательская группа ВНУ, 2004, — 847 с.: ил.
4. **Кляйнрок, Л.** Теория массового обслуживания[Текст] / Л. Кляйнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
5. **Максимей И.В.** Имитационное моделирование на ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988.
6. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным – М.: Радио и связь, 1987. – 120с.
7. **Сети ЭВМ.** Под редакцией В.М. Глушкова – М.: Связь, 1977
8. **Урывский, Л.А.** Зависимость пропускной способности дискретного канала связи от его энергетического потенциала при использовании многопозиционных сигналов [Текст] // Л.А.Урывский, Е.А.Прокопенко.// Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку: науково-виробничий збірник. – К, 2009.– № 1. – С. 105.
9. **Урывский, Л. А.**Обобщение процесса «размножение и гибели» на системы с «конфліктом доступа» [Текст] / Л. А. Урывский // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку : науково-виробничий збірник. – К, 2009. – № 1(7). – С. 97-104.
10. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем - искусство и наука: Пер. с англ. - М.: Мир, 1978.

**11. Шрайбер Т.Дж.** Моделирование на GPSS: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1980.

**12. GPSS/PC** general purpose simulation. Reference Manual. - Minuteman software. P.O. Box 171. Stow, Massachusetts 01775, 1986.

**Основні теоретичні дані для виконання лабораторних робіт****Лабораторна робота №1**

При обчисленні методом Монте-Карло статистичні результати виходять шляхом повторюваних випробувань.

Імовірність того, що ці результати відрізняються від справжніх не більше ніж на задану величину, є функція кількості випробувань.

*Генератор псевдовипадкових чисел* (ГПВЧ) - алгоритм, який породжує послідовність чисел, елементи якої майже незалежні один від одного.

Від якості використовуваних ГПВЧ безпосередньо залежить якість одержуваних результатів.

Для використання методу Монте-Карло необхідні рівномірно розподілені

випадкові числа (РВЧ) в діапазоні  $[0, 1]$ .

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{для } x < a, \\ 1/(b-a), & \text{для } a \leq x \leq b, \\ 0, & \text{для } x > b. \end{cases}$$

**Математичне очікування та дисперсія випадкової величини:**

$$m(x) = \frac{a+b}{2},$$

$$\sigma^2(x) = \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Таким чином, для випадкової величини в діапазоні  $[0,1]$ :

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{для } x < 0, \\ 1, & \text{для } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{для } x > 1. \end{cases}$$

$$m(x) = \frac{1}{2},$$

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{12}.$$

Показники випадковості:

- Математичне очікування
- Дисперсія
- Перевірка на серії
- Відповідність виду розподілу

## Лабораторна робота №2

### Рівномірний закон розподілу:

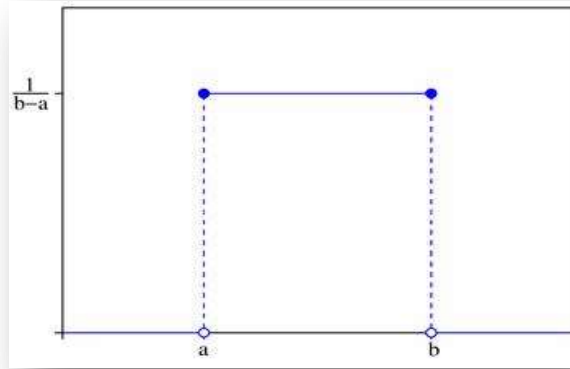
*Рівномірний закон розподілу* використовується в ряді завдань масового обслуговування, при статистичному моделюванні спостережень, підлеглих заданому розподілу, таких як, наприклад, віддалення користувачів від БС.

Щільність розподілу:

$$p(\xi) = \begin{cases} 0: & \xi < a \\ \frac{1}{b-a}: & a \leq \xi \leq b \\ 0: & \xi > b \end{cases}$$

Числові характеристики:

$$M(\xi) = \frac{a+b}{2}, D(\xi) = \frac{(b-a)^2}{12}, \sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}$$

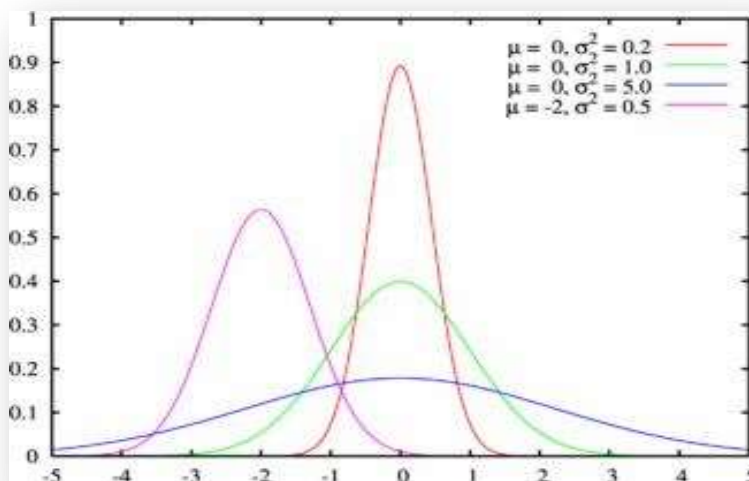


### Нормальний закон розподілу:

Неперервна випадкова величина  $\xi$  називається гаусівською, якщо її щільність ймовірності описується виразом для нормального розподілу:

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

де  $\mu = M(\xi)$  – математичне сподівання,  $D = M\{(\xi - \mu)^2\} = \sigma^2$  – дисперсія випадкової величини  $\xi$ , середньоквадратичне відхилення випадкової величини:  $\sigma = \sqrt{D}$ .



## Розподіл Пуассона

Ймовірнісний розподіл дискретного типу, який моделює випадкову величину, яка відображує **число подій**, що сталися за **фіксований час**, за умови, що дані події відбуваються з деякою фіксованою середньою інтенсивністю і незалежно один від одного.

Дискретна випадкова величина  $Y$  має розподіл Пуассона з параметром  $\lambda > 0$ , якщо при  $k = 0, 1, 2, \dots$  функція ймовірності  $Y$  визначається за формулою:

$$p(k) \equiv \mathbb{P}(Y = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

Параметр розподілу  $\lambda$  дорівнює середньому числу появи подій в однакових незалежних випробуваннях, тобто  $\lambda = k \cdot p$ , де  $p$  – ймовірність події при одному випробуванні,  $k$  – частота даної події.

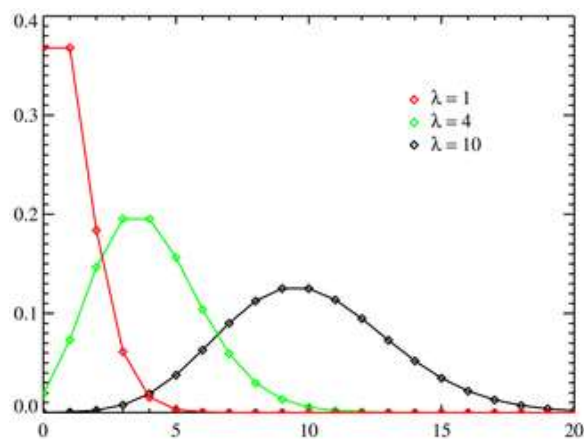
Той факт, що випадкова величина  $Y$  має розподіл Пуассона з параметром  $\lambda$ , записується:  $Y \sim P(\lambda)$ .

Твірна функція моментів розподілу Пуассона має вигляд:

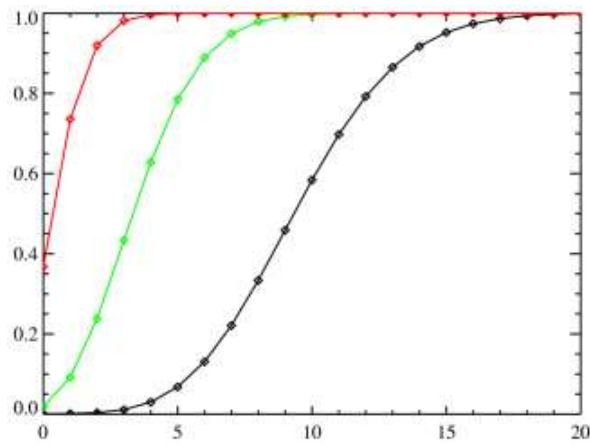
$$E_Y(t) = e^{\lambda(e^t - 1)}$$

звідки

$$\mathbb{M}[Y] = \lambda, \mathbb{D}[Y] = \lambda.$$



Функція ймовірностей



Функція розподілу

### Лабораторна робота № 3

Апріорна щільність та апостеріорна ймовірність

$W(S' / b_i)$  – умовна щільність розподілу значень сигналу  $S'(t)$  при передачі символу  $b_i$ ,- *апріорна щільність розподілу*.

Позначимо через  $P(b_i / S')$  ймовірність того, що при прийомі реалізації  $S'(t)$  прийнято рішення про прийом символу  $b_i$ . Ця ймовірність називається *апостеріорною*.

Її можна визначити за допомогою відомої формули Байеса:

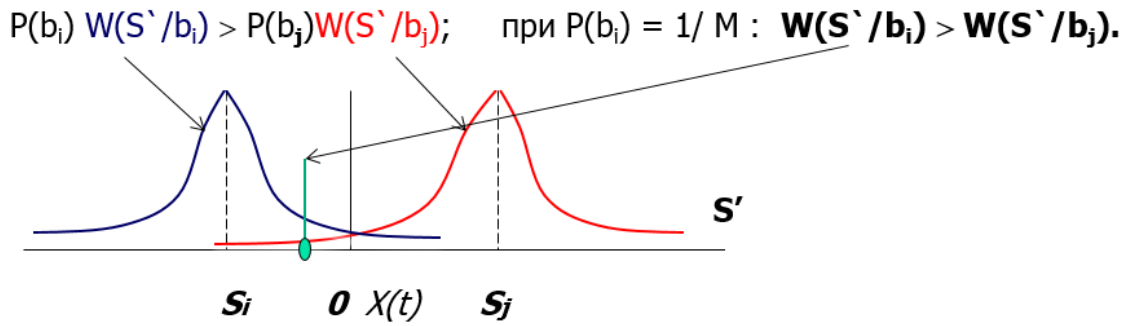
$$P(b_i / S') = \frac{P(b_i)W(S' / b_i)}{W(S')}$$

Рішення на користь  $i$ -го символу приймається, якщо

$$P(b_i / S') > P(b_j / S'), (j = 1, \dots, m, j \neq i),$$

тобто схема вибирає рішення, відповідні більшій апостеріорній ймовірності





Апріорна густина та апостеріорна ймовірність при використанні критерія ПМП.

### Оцінка показників якості безпроводових систем зв'язку

$$p_{\text{ПОМ QPSK}}(h^2) = \frac{3}{4} - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{h^2}) - \frac{1}{4} \Phi^2(\sqrt{h^2})$$

$$p_{b\text{QPSK}}(h^2) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2} \cos \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

$$p_{\text{ПОМ QAM}}(h^2) = 1 - \left( 1 - \frac{2(1 - \frac{1}{\sqrt{M}})}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}}h^2}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \right)^2$$

$$P_{b\text{QAM}}(h^2) = \frac{4(1 - \frac{1}{\sqrt{M}})}{k\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}}h^2}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

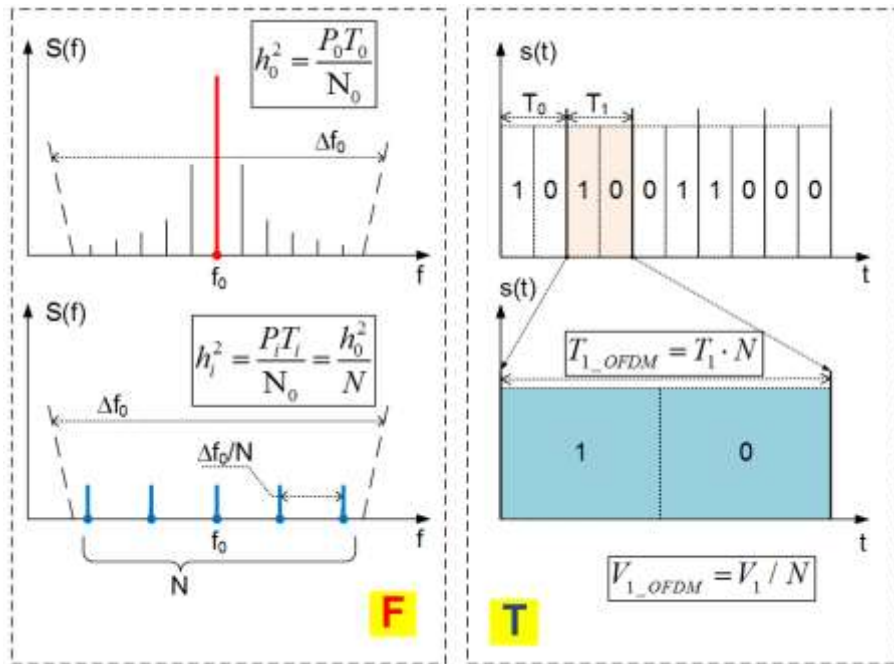
$$p_{\text{ПОМ ФМ8}}(h^2) = 2T\left(\sqrt{2h^2} \sin \frac{\pi}{8}; \operatorname{tg} \frac{3}{8} \pi\right) + \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2} \sin \frac{\pi}{8}\right) \right]$$

$$T(H, a) = \frac{1}{2\pi} \int_H^{\infty} \int_0^{ax_1} e^{-\frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2$$

## Лабораторна робота № 4

Таблиця 4.1. Порівняння параметрів одночастотної передачі та OFDM

Параметр	Одночастотна передача	OFDM
Число несучих (піднесучих)	$N = 1$	$N_{OFDM} = 2^p$ , де $p > 1$ – ціле
Смуга частот	$\Delta F_0 = 20 \text{ МГц}$	<p>Одна піднесуча займає тільки частину смуги частот:</p> $\Delta f_i = \frac{\Delta F_0}{N_{OFDM}}$ <p>Сумарна смуга дорівнює сумі смуг піднесучих:</p> $\Delta F_{\Sigma} = N_{OFDM} \cdot \Delta f_i = \Delta F_0$
Довжина символу	$\Delta T_0 = \frac{1}{\Delta F_0}$	<p>Довжина OFDM символу в <math>N_{OFDM}</math> раз більше довжини символу при одночастотній передачі, що є одним із ключових факторів при виборі OFDM для використання в системі передачі:</p> $\Delta t_i = \frac{1}{\Delta f_i} = N_{OFDM} \cdot \frac{1}{\Delta F_0} \gg \Delta T_0$



Часові та частотні параметри OFDM сигналу

Таблиця.4.2.Порівняння параметрів одночастотної передачі та OFDM

Параметр	Одночастотна передача	OFDM
Швидкість передачі символів	$V_C = \Delta F_0 = 20 \frac{Msc}{c}$	<p>Швидкість передачі на одну піднесучу в <math>N_{OFDM}</math> раз менше, ніж число піднесучих:</p> $V_{C\_i} = \frac{V_C}{N_{OFDM}} \ll V_C$ <p>Сумарна швидкість передачі є такою ж, як і при одночастотній передачі:</p> $V_{C\_Σ} = N_{OFDM} \cdot V_{C\_i} = V_C$
Потужність випромінювання передавача	$P_{изл}$	<p>Потужність однієї піднесучої: <math>P_i = \frac{P_{изл}}{N_{OFDM}^2}</math></p> <p>Сумарна потужність OFDM сигналу, що випромінюється:</p> $P_Σ = \sum_i P_i = \frac{P_{изл}}{N_{OFDM}} \ll P_{изл}$

## Лабораторна робота № 5

Центральною характеристикою системи виступає її продуктивність, що дорівнює середньому числу заявок  $Y_{ОБСЛ}$ , що обслуговуються СМО в одиницю часу, або абсолютна пропускна спроможність СМО.

Якщо позначити середнє число заявок в черзі  $r_{чер.}$ , то середня кількість заявок в СМО (які обслуговуються або очікують у черзі)  $Z_{СИСТ}$  визначається як:

$$Z_{СИСТ} = Y_{ОБСЛ} + r_{ЧЕР}$$

Для будь-якої відкритої СМО в граничному стаціонарному режимі середній час перебування заявки в системі  $t_{СИСТ}$  виражається через середнє число заявок в системі  $Z_{СИСТ}$  за допомогою формули Літтла:

$$t_{СИСТ} = Z_{СИСТ} / \lambda$$

Аналогічна формула (називається також формулою Літтла) пов'язує середній час перебування заявки в черзі  $t_{ЧЕР}$  і середнє число  $r_{ЧЕР}$  заявок в черзі:

$$t_{ЧЕР} = r_{ЧЕР} / \lambda$$

Аналогічну універсальну дію для відкритих СМО має формула, що виражає середнє число зайнятих каналів  $N_{СР}$  через абсолютну пропускну здатність  $Y_{ОБСЛ}$ :

$$N_{СР} = Y_{ОБСЛ} / \mu$$

## Лабораторна робота № 6

Середній час перебування заявки в системі:

$$\tau_{СИСТ} = \tau_c \cdot P_{ОБСЛ} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{1}{\mu + \lambda};$$

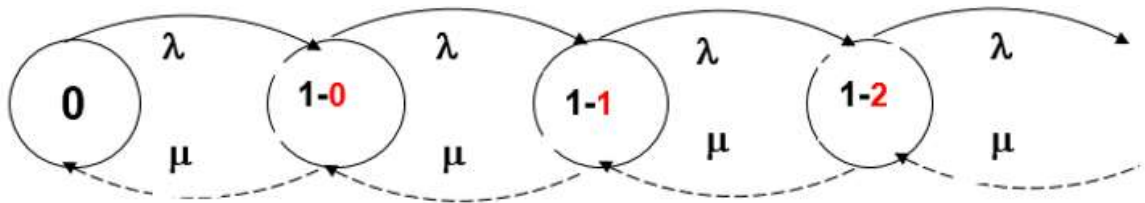
$$p_1 = n_{ЗАН};$$

$$\tau_{СИСТ} = \tau_c \cdot P_{ОБСЛ} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{p_1 \mu}{\lambda} = \frac{n_{ЗАН}}{\lambda};$$

$$\tau_{СИСТ} < \tau_c;$$

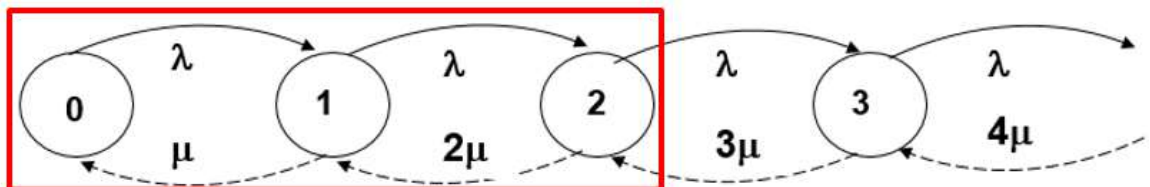
$$\frac{\tau_{СИСТ}}{\tau_c} = P_{ОБСЛ} = \theta_{ОБСЛ}.$$

Для СМО з одним приладом для обслуговування і з  $r$  місцями для очікування в черзі (класу  $M/M/1/r$ ) ланцюг дискретних станів можна представити у вигляді, відображеному на рисунку



Ланцюг станів і переходів в СМО з одним приладом обслуговування і чергою ( $M/M/1/r$ )

Ланцюг дискретних станів для СМО з  $N$  приладами для обслуговування без організації черги (класу  $M/M/N$ )



Стани перенумеровані в залежності від числа задіяних приборів обслуговування в стани  $i, i=1, \dots, N$ .

Інтенсивність переходу між станами заявок –  $\lambda_i = \lambda$ , а інтенсивність обслуговування заявок в  $i$ -м стані –  $\mu_i = i \cdot \mu$ .

Ймовірність перебування системи в  $i$ -му стані (всього  $N+1$  станів):

$$P(S_i) = P_i = \frac{\frac{\rho^i}{i!}}{\sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!}},$$

умова нормування має вигляд:

$$\sum_{i=0}^N P_i = 1.$$

В якості підсумкових характеристик системи можна прийняти:

– Ймовірність обслуговування заявок в системі (показник якості обслуговування):

$$P_{\text{ОБСЛ}} = \sum_{i=0}^{N-1} P_i,$$

при цьому ймовірність відмови в обслуговуванні заявки–

$$P_{\text{ВІДМ}} = P_N = 1 - P_{\text{ОБСЛ}};$$

– середній час перебування заявки в системі (показник своєчасності обслуговування):

$$\tau_{\text{СИСТ}} = \left\{ \sum_{i=1}^N i \cdot P_i \right\} / \lambda;$$

– інтенсивність обслуженого навантаження  
(продуктивність системи):

$$Y_{\text{ОБСЛ}} = \sum_{i=1}^N i \cdot P_i.$$

## Лабораторна робота № 7

### Методика розрахунку продуктивності системи

1.Визначення максимального радіуса зони обслуговування (**R,км**), в межах якої забезпечується допустима якість зв'язку (**P<sub>пом</sub>**) при відомій швидкості передачі даних від користувача (**V, Мбіт/сек**).

2.Визначення кількості користувачів (**N, абон.**) на охоплюваній території площею **S=πR<sup>2</sup>**, виходячи з щільності абонентів (**q, абон./км<sup>2</sup>**), що користується послугами обраного оператора: **N=S\*q, абон.**

3.Визначення інтенсивності потоку (**A, Ерл.**) звернень до системи, виходячи із середньої активності одного користувача (**a, Ерл/чол.**): **A=N\*a, Ерл.**

4.Визначення продуктивності системи в просторі стільника (**Y, Мбіт**) при обраному способі передачі (маніпуляції) і обраному якості зв'язку (допустимій ймовірності помилки), виходячи з швидкості передачі потоку даних для одного абонента (**V, Мбіт/с**): **Y=V\*A, Мбіт/ЧНН.**